



## تحلیل حساسیت بر پایه قابلیت اعتماد قاب برشی مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی

محمد رضا سیفی اسگ شهر\*

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵  
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۱/۱۰  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۹  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۳/۰۸

### کلمات کلیدی:

میراگر ویسکوز غیرخطی  
قاب برشی  
قابلیت اعتماد  
تحلیل حساسیت  
نمونه‌گیری مونت کارلو

**خلاصه:** اخیراً میراگرهای ویسکوز غیرخطی به صورت گسترده‌ای برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این میراگرها انرژی جنبشی ناشی از زلزله را با تولید نیروی میرایی مستهلک می‌کنند. طراحی این میراگرها به گونه‌ای است که نیروی ایجاد شده در آن‌ها متناسب با سرعت است. مدل ماکسول متداول‌ترین مدل برای مدل‌سازی رفتار میراگرهای ویسکوز غیرخطی می‌باشد. در این مدل ضریب میرایی، توان سرعت و سختی محوری میراگر پارامترهای کلیدی محسوب می‌شوند. در اکثر مطالعات گذشته، عدم قطعیت موجود در پارامترهای درگیر در رفتار میراگر ویسکوز نادیده گرفته شده است؛ در حالی که می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها داشته باشد. در این مطالعه ابتدا تحلیل قابلیت اعتماد یک قاب برشی مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی با استفاده از روش نمونه‌گیری مونت‌کارلو انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دریافت بیشینه از ۰/۱۵ به ۰/۰۲ منجر به کاهش ۷۲ درصدی احتمال انهدام شده است. سپس تحلیل حساسیت مبتنی بر قابلیت اعتماد قاب مورد مطالعه به منظور تعیین مؤثرترین متغیر تصادفی بر روی قابلیت اعتماد قاب انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که توان سرعت مؤثرترین متغیر تصادفی در قابلیت اعتماد قاب می‌باشد. همچنین نتایج دلالت بر آن دارند که میزان اهمیت متغیرهای تصادفی بستگی به تابع حالت حدی مورد استفاده در تحلیل قابلیت اعتماد دارد. برای نمونه مقدار اهمیت متغیر تصادفی ضریب میرایی نسبت به توان سرعت به ازای دریافت بیشینه ۰/۱۵ و ۰/۰۲۵ به ترتیب ۵۹ و ۹/۵ درصد کمتر است.

### ۱- مقدمه

نیروهای ناشی از جابه‌جایی داخلی قاب ساختمانی تحت بارگذاری لرزه‌ای است [۵]. زلزله‌های اخیر کارایی میراگرهای ویسکوز در اصلاح پاسخ ساختمان‌ها در راستای کنترل خسارت‌های اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای را اثبات نموده است [۶ و ۷].

عملکرد قاب‌های ساختمانی مجهز شده به میراگرهای ویسکوز به صورت گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعات ابتدایی رویکرد تعیینی برای این مسئله انتخاب شده و عدم قطعیت پارامترهای دخیل در رفتار سازه‌های مجهز شده به میراگرهای ویسکوز نادیده گرفته شده است [۹ و ۸]. با این حال به دلیل وجود عدم قطعیت در بارهای لرزه‌ای وارد بر سازه و همچنین مشخصات سازه مجهز شده به میراگر ویسکوز، استفاده از رویکرد احتمالاتی برای بررسی عملکرد این نوع از سازه‌ها ضروری خواهد بود؛ از این رو مطالعاتی با این رویکرد انجام یافته است. دی پائولا<sup>۱</sup> و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۰۷ روش ارتعاشات تصادفی را برای تحلیل عدم قطعیت

ایمنی سازه‌های ساختمانی و محافظت از جان ساکنین و همچنین محتویات سازه‌ها هدف نهایی طراحی سازه‌ای تحت خطراتی مانند زلزله است. سیستم‌های کنترل سازه‌ای در مهندسی زلزله برای محافظت از سازه‌ها در مقابل اثرات مخرب زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیستم‌ها به گروه‌های غیرفعال، فعال، نیمه‌فعال و ترکیبی دسته‌بندی می‌شوند. در سه دهه اخیر انواع مختلفی از دستگاه‌های میرایی تکمیلی توسعه داده شده و در ساختمان‌ها به منظور کنترل ارتعاشات ناشی از زلزله مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳-۱]. به ویژه کاربرد میراگرهای ویسکوز به عنوان زیرمجموعه‌ای از کنترل غیرفعال در ساختمان‌های در معرض خطر لرزه‌ای به صورت قابل توجهی افزایش یافته است چون این دستگاه‌ها توانایی کاهش پاسخ سازه را با کمترین هزینه نسبت به سایر روش‌ها دارند [۴ و ۲]. میراگرهای ویسکوز دارای این مزیت هستند که نیروهای ایجاد شده در آن‌ها عموماً خارج از فاز با

1 Di Paola

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m.seifi@azaruniv.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



ارزیابی قابلیت اعتماد لرزه‌ای سازه مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی، تعیین مهم‌ترین پارامتر معرف میراگر در قابلیت اعتماد آن است تا بتوان در بهینه‌سازی سازه‌های مجهز شده به میراگر ویسکوز از آن استفاده کرد. مطالعاتی در زمینه تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی سازه‌های مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی انجام شده است [۲۲ و ۲۱]. با این حال تاکنون مطالعه‌ای با استفاده از روش تحلیل حساسیت بر پایه قابلیت اعتماد سازه مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی به منظور تعیین مهم‌ترین پارامتر مؤثر در قابلیت اعتماد لرزه‌ای این سازه‌ها انجام نشده است.

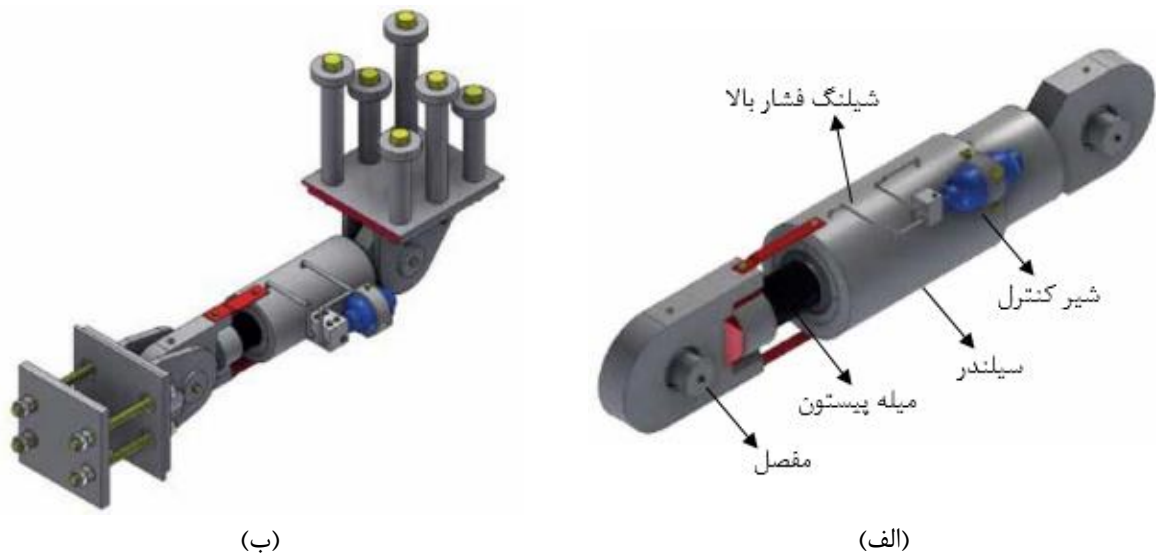
در تحلیل حساسیت بر پایه قابلیت اعتماد، استفاده زیادی از روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول شده است [۲۳]. با این حال مشکلات همگرایی و همچنین نتایج غیردقیق در تحلیل حساسیت بر پایه روش مذکور به ویژه در توابع حالت حدی غیرخطی وجود خواهد داشت چون این روش نیاز به مشتق پاسخ تابع حالت حدی غیرخطی جهت حل مسئله بهینه‌سازی و یافتن نقطه طراحی و سپس خطی‌سازی در آن نقطه دارد. به منظور غلبه بر این محدودیت‌ها، رویکرد تحلیل حساسیت بر پایه قابلیت اعتماد با استفاده از روش نمونه‌گیری پیشنهاد شده است که منجر به نتایج دقیق برای تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای توزیع احتمال متغیرهای تصادفی درگیر در قابلیت اعتماد سازه صرف نظر از خاصیت غیرخطی و مشتق‌ناپذیری تابع حالت حدی می‌شود [۲۴].

در ارزیابی قابلیت اعتماد لرزه‌ای سازه مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی، تابع حالت حدی نسبت به متغیرهای تصادفی درگیر به شدت غیرخطی است و بنابراین در این مطالعه به منظور تخمین دقیق حساسیت قابلیت اعتماد سازه نسبت به متغیرهای تصادفی بدون مواجهه با مشکلات همگرایی که احتمالاً در حین قابلیت اعتماد مرتبه اول رخ می‌دهد، تحلیل حساسیت بر پایه قابلیت اعتماد با استفاده از روش نمونه‌گیری سازه مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی در راستای تشخیص متغیرهای تصادفی که بیشترین تأثیر در قابلیت اعتماد لرزه‌ای سازه را دارند، انجام شده است. به این منظور قاب برشی یک طبقه مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده و مدل غیرخطی آن در نرم‌افزار OpenSees [۲۵] توسعه داده شده است. بر اساس توضیحات داده شده، به دلیل زوال میراگر ویسکوز غیرخطی در طول عمر مفید سازه، در راستای اعمال عدم قطعیت رفتار میراگر در تحلیل لرزه‌ای سازه، سه پارامتر ضریب میرایی، توان سرعت و سختی محوری به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین به منظور ملاحظه عدم قطعیت رکورد به رکورد، چندین

در بارگذاری لرزه‌ای و اثرات آن بر روی پاسخ سازه‌های مجهز شده به میراگر ویسکوز به کار گرفته‌اند. گونیزی و آلتای<sup>۱</sup> [۱۱] در سال ۲۰۰۸ شکنندگی لرزه‌ای ساختمان بتن‌آرمه بلند مرتبه مقاوم‌سازی شده با استفاده از میراگرهای ویسکوز با نسبت‌های میرایی مؤثر مختلف تحت رکوردهای مصنوعی حرکت زمین را مورد بررسی قرار دادند. لاوان و آویشور<sup>۲</sup> [۱۲] در سال ۲۰۱۳ اثرات عدم قطعیت پارامترهای مدل بر روی پاسخ قاب‌های غیرارتجاعی با میراگر ویسکوز را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که ملاحظه عدم قطعیت‌ها منجر به میانگین تقاضای دریفت بزرگ‌تر نسبت به مقدار مورد انتظار مدل قاب با خصوصیات قطعی می‌شود. کولمبو و آلمان<sup>۳</sup> [۱۳] در سال ۲۰۱۵ قابلیت اعتماد لرزه‌ای مخازن ذخیره مایعات با تجهیزات استهلاک انرژی خارجی را ارزیابی کرده و نشان دادند که سیستم استهلاک انرژی خارجی توانایی کاهش قابل توجه احتمال فرار رسیدن حالت حدی را دارد. دال‌آستا<sup>۴</sup> و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۶ عملکرد ساختمان‌های مجهز شده به میراگرهای ویسکوز غیرخطی را به صورت سیستم‌های یک درجه آزادی و چند درجه آزادی تحلیل و بررسی کردند. آلتیری<sup>۵</sup> و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۷ روشی بر پایه قابلیت اعتماد را برای طراحی بهینه میراگرهای ویسکوز پیشنهاد دادند. آکجلیان<sup>۶</sup> و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۸ الگوریتم یک روش عددی تطبیقی برای مدل‌های ویسکوز غیرخطی در معرض بارگذاری دینامیکی را ارائه دادند.

مدل ماکسول [۱۷] (فتر متصل شده به صورت سری به ضربه‌گیر) متداول‌ترین مدل برای مدل‌سازی رفتار میراگرهای ویسکوز غیرخطی می‌باشد. این مدل قادر به در نظر گرفتن وابستگی رفتار میراگر ویسکوز به سختی و فرکانس می‌باشد [۱۹، ۱۸ و ۸]. در صورت استفاده از مدل ماکسول، سه پارامتر ضریب میرایی، توان سرعت و سختی محوری میراگر پارامترهای اصلی معرف میراگر ویسکوز غیرخطی خواهند بود. از طرفی نشأت محتمل سیال ویسکوز در سیستم میراگر خسارت دیده، عملکرد آن‌ها را در عمر مفید سازه مختل می‌نماید [۲۰]. بنابراین تحلیل دقیق از عملکرد لرزه‌ای سازه مجهز شده به میراگر ویسکوز بایستی با ملاحظه عدم قطعیت‌های پارامترهای ضریب میرایی، توان سرعت و سختی محوری میراگر ویسکوز ناشی از زوال آن در طول عمر مفید سازه، انجام شود. یکی از مسائل مهم در

- 1 Guneyisi and Altay
- 2 Lavan and Avishur
- 3 Colombo and Almazan
- 4 Dall'Asta
- 5 Altieri
- 6 Akcellyan



شکل ۱. (الف) اجزای اصلی و (ب) نحوه اتصال به سازه میراگر ویسکوز [۲۹]

Fig. 1. (a) Main components, (b) connection to the structure of viscous damper [29]

## ۲- رفتار میراگر ویسکوز غیرخطی

میراگرهای ویسکوز محتوی یک مایع پلیمری هستند که جریان آن در روزنه‌ها منجر به تفاضل فشار در عرض سربستون شده و نیروی میراگر را تولید می‌نماید (شکل ۱). تحت بار زلزله جابه‌جایی سازه پیستون و سیلندر را هل داده و منجر به جابه‌جایی نسبی می‌شود. این جابه‌جایی منجر به جریان روغن سیلیکونی شده و ناشی از جابه‌جایی سیال به علت اصطکاک بین مولکول‌ها و سطح سیلندر حرارت تولید شده و در واقع انرژی لرزه‌ای تبدیل به حرارت شده و اثر میرایی ایجاد می‌شود. طراحی روزنه‌ها تحمیل کننده رابطه بین نیرو و سرعت است. بنابراین رابطه کلی نیرو-سرعت مدل‌های ویسکوز غیرخطی از لحاظ ریاضی به صورت زیر بیان می‌شود [۱۶]:

$$F_d(t) = C_d |\dot{u}_d(t)|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{u}_d(t)) \quad (1)$$

که  $F_d(t)$  نیروی میراگر در زمان  $t$ ،  $C_d$  ضریب میرایی،  $\dot{u}_d(t)$  سرعت ضربه‌گیر در زمان  $t$ ،  $\alpha$  توان سرعت و  $\operatorname{sgn}$  تابع علامت است. به ازای مقدار  $\alpha = 1$ ، میراگر ویسکوز خطی بوده در حالی که برای مقدار  $\alpha = 0$  رابطه هیسترتیک نیرو-جابه‌جایی میراگر ویسکوز مستطیلی می‌شود که برای میراگرهای اصطکاکی متداول است. در قاب‌های ساختمانی مجهز

رکورد زلزله در تحلیل تاریخچه زمانی مورد استفاده قرار گرفته و به منظور سازگاری بهتر آن‌ها با طیف هدف از روش طیف میانگین شرطی [۲۶] برای انتخاب آن‌ها استفاده شده است. تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای احتمالاتی با ملاحظه این عدم قطعیت‌ها در سازه و همچنین رکوردهای زلزله، بهترین روش برای تعیین عملکرد لرزه‌ای واقع‌گرایانه از قاب برشی مجهز با میراگر ویسکوز غیرخطی می‌باشد. به دلیل پیچیدگی توصیف مشخصات احتمالاتی مسئله قابلیت اعتماد لرزه‌ای به صورت تحلیلی، روش شبیه‌سازی مونت کارلو [۲۷] می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب مورد استفاده قرار بگیرد. این روش یک تکنیک دقیق برای انجام تحلیل ایمنی و قابلیت اعتماد بر پایه مدل‌سازی ریاضی و تحلیل کامپیوتری است که عدم قطعیت در آن با تعریف متغیرهای تصادفی با توزیع احتمالاتی مشخص اعمال می‌شوند. در این مطالعه تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای با استفاده از روش نمونه‌گیری مونت کارلو در نرم‌افزار Rt [۲۸] انجام شده است. تابع حالت حدی در نظر گرفته شده در تحلیل قابلیت اعتماد قاب برشی در تحلیل نمونه‌گیری، بر اساس دریافت جانبی قاب برشی تعریف شده و تابع توزیع تجمعی دریافت جانبی قاب توسعه داده شده است. بر اساس این توزیع احتمال، تعیین احتمال فراگذشت از هر دریافت مجاز امکان‌پذیر خواهد بود. در نهایت تحلیل حساسیت مبتنی بر قابلیت اعتماد قاب مورد مطالعه به منظور تعیین مؤثرترین متغیر تصادفی بر قابلیت اعتماد لرزه‌ای قاب برشی انجام شده است.

$$g(\mathbf{x}) = R(\mathbf{x}) - S(\mathbf{x}) \quad (۲)$$

در حقیقت روش‌های قابلیت اعتماد آن که  $g$  مقدار منفی اختیار نماید را محاسبه می‌کنند. در حالت کلی به آن احتمال فراگذشت (EP) گفته می‌شود که با  $G$  نشان داده شده و به شاخص قابلیت اعتماد  $\beta$  بستگی دارد و با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$G = \Phi(-\beta) \quad (۳)$$

که  $\Phi$  تابع توزیع تجمعی (CDF) نرمال استاندارد است. برای محاسبه احتمال فراگذشت EP می‌توان از روش نمونه‌گیری مونت کارلو استفاده کرد. روش‌های قابلیت اعتماد سازه‌ای مقدار  $G$  را به صورت عددی با ارزیابی انتگرال چندگانه زیر محاسبه می‌کنند:

$$G = \int_{g(\mathbf{x}) \leq 0} \dots \int f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (۴)$$

که  $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$  تابع چگالی احتمال (PDF) متغیرهای تصادفی  $\mathbf{x}$  است. توجه شود که انتگرال‌گیری در محدوده انهدام انجام می‌شود که با  $g(\mathbf{x}) \leq 0$  نشان داده می‌شود. روش‌های قابلیت اعتماد به روش نمونه‌گیری این انتگرال را با معرفی تابع شاخص  $I$  به صورت رابطه زیر محاسبه می‌کنند:

$$G = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} I(\mathbf{x}) \cdot f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (۵)$$

که  $I(\mathbf{x})$  تابع پله‌ای است که معادل با واحد خواهد بود زمانی که  $g(\mathbf{x}) \leq 0$  باشد و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود. در واقع  $G$  امید ریاضی  $I(\mathbf{x})$  نسبت به توزیع  $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$  است؛ بنابراین رابطه زیر را می‌توان نوشت:

$$G = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K I(\mathbf{x}^k) \quad (۶)$$

که  $K$  تعداد نمونه‌ها و  $\mathbf{x}^k$  بردار برآمدهای  $\mathbf{x}$  در نمونه  $k$ -ام هستند. در کاربردهای عملی، تابع چگالی احتمال توأم متغیرهای  $\mathbf{x}$  یعنی  $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$  به صورت تحلیلی در دسترس نمی‌باشد. در نتیجه اعداد تصادفی در هر نمونه برای متغیرهای استاندارد نرمال تولید می‌شوند که با  $\mathbf{y}$  نشان

شده به میراگر ویسکوز خطی، نیروی میرایی بزرگی به ازای تقاضای سرعت بالا ایجاد می‌شود که منجر به طراحی محافظه‌کارانه در طراحی به روش ظرفیت می‌شود [۱۶]. برای جلوگیری از این مشکل در قاب‌های ساختمانی استفاده از میراگرهای ویسکوز غیرخطی با  $\alpha < 1$  مطلوب خواهد بود. بر خلاف فرض ایده‌آل‌سازی شده مدل‌های ضربه‌گیر ویسکوز خالص، میراگرهای ویسکوز مشخصه‌های وابسته به سختی از خود نشان می‌دهند که عموماً کارایی میراگر ویسکوز را تضعیف می‌نماید [۱۸]. میراگرهای ویسکوز در قاب‌های ساختمانی عموماً با مهاربندها نصب می‌شوند که انعطاف‌پذیری محوری بیشتری به میراگر داده و رفتار هیسترتیک آن را تحت بارگذاری دینامیکی تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۶]. با این حال در حالت میراگرهای ویسکوز غیرخطی، روش معمول چشم‌پوشی از سختی محوری میراگر است، در حالی که نشان داده شده است که رفتار هیسترتیک میراگر ویسکوز به سختی محوری و همچنین مشخصات فرکانسی نیروی خارجی اعمالی بستگی خواهد داشت [۸]. آزمایش میز لرزان در مورد ساختمان قابی مجهز با میراگرهای ویسکوز نشان داده است که ملاحظه سختی محوری میراگر به منظور تخمین تقاضای لرزه‌ای موضعی و کلی سازه ضروری خواهد بود [۳۰]. تحقیق نشان داده است که تقاضاهای نیروهای ناشی از جابه‌جایی و نیروی میراگر ممکن است در یک قاب ساختمانی به علت سختی محوری میراگر هم‌فاز باشند [۳۱]. این مسئله می‌تواند اثر قابل توجهی بر روی تقاضای لرزه‌ای منتقل شده به ستون‌ها و فونداسیون داشته باشد و بایستی در تحلیل سازه در نظر گرفته شود [۱۶]. برای ملاحظه اثر سختی محوری میراگر ویسکوز غیرخطی و همچنین فرکانس بار خارجی، مدل ماکسول مناسب خواهد بود [۱۹، ۱۸ و ۸]. در این مدل، ضربه‌گیر غیرخطی و فنر خطی به صورت سری به یکدیگر متصل می‌شوند.

### ۳- تحلیل حساسیت بر پایه قابلیت اعتماد

تحلیل قابلیت اعتماد کلاسیک شامل دو بخش اصلی است: متغیرهای تصادفی و توابع حالت حدی. متغیرهای تصادفی که در بردار  $\mathbf{x}$  جمع‌آوری می‌شوند، توصیف کننده عدم قطعیت‌ها در مسئله هستند. تابع حالت حدی  $g$  توصیف کننده رویدادی است که احتمال آن مورد نظر است. مشابه مسئله قابلیت اعتماد پایه فرض می‌شود که احتمال انهدام یک سیستم مدنظر باشد. انهدام زمانی رخ می‌دهد که تقاضای  $S(\mathbf{x})$  سیستم از مقاومت  $R(\mathbf{x})$  تجاوز می‌کند که منجر به تابع حالت حدی زیر می‌شود [۲۴]:

$$\eta = \left[ \frac{\partial \beta}{\partial \sigma_i} \sigma_i \right] \quad (10)$$

بزرگ‌ترین مقدار مطلق در بردار  $\delta$  مؤید متغیری است که بیشترین تأثیر را بر روی احتمال انهدام و در نتیجه قابلیت اعتماد سیستم دارد. همچنین علامت مثبت اعضای بردار  $\delta$  دلالت بر متغیر از نوع مقاومت داشته و علامت منفی آن‌ها دلالت بر متغیر نوع بار دارد. در متغیر تصادفی از نوع مقاومت با افزایش مقدار متغیر تصادفی مقدار شاخص قابلیت اعتماد افزایش می‌یابد در حالی که در متغیر تصادفی از نوع بار با افزایش آن از مقدار شاخص قابلیت اعتماد کاسته می‌شود. همچنین بزرگ‌ترین مقدار مطلق بردار  $\eta$  مؤید متغیری است که عدم قطعیت آن بیشترین سهم را در احتمال انهدام سیستم دارد.

لازم به ذکر است که مقدار  $\partial \beta / \partial \theta$  اشاره شده در روابط (۹) و (۱۰)، با مشتق‌گیری از طرفین رابطه (۳) و با استفاده از قاعده زنجیری مشتق به صورت زیر تعیین می‌شود [۲۴]:

$$\frac{\partial \beta}{\partial \theta} = -\frac{1}{\varphi(\beta)} \cdot \frac{\partial G}{\partial \theta} \quad (11)$$

که  $\varphi$  تابع چگالی احتمال (PDF) نرمال استاندارد بوده و  $\partial G / \partial \theta$  با استفاده از رابطه (۶) قابل تعیین خواهد بود.

#### ۴- مطالعه موردی

در این مطالعه تحلیل حساسیت بر پایه قابلیت اعتماد قاب برشی یک طبقه انجام خواهد شد. در ادامه مشخصات قاب برشی و میراگر ویسکوز غیرخطی استفاده شده در آن و نحوه مدل‌سازی آن‌ها در نرم‌افزار OpenS-ees، رکوردهای زلزله انتخاب شده برای استفاده در تحلیل تاریخچه زمانی و نحوه انجام تحلیل قابلیت اعتماد به روش نمونه‌گیری در نرم‌افزار Rt توضیح داده خواهند شد.

##### ۴-۱- مشخصات قاب برشی

در این مطالعه قاب برشی یک طبقه مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی با دهانه ۵ متر و ارتفاع ۳ متر مطابق شکل ۲ برای تحلیل حساسیت بر پایه قابلیت اعتماد در نظر گرفته شده است. وزن کل سقف ۱۰۰۰ kN، زمان تناوب قاب ۰/۷ S، مدول الاستیسیته ستون‌ها ۲۰۰ kN/mm<sup>2</sup>، سختی جانبی قاب ۸/۲ kN/mm و ممان اینرسی ستون‌ها ۴۶/۱۲۵×۱۰<sup>۶</sup> mm<sup>4</sup>

داده می‌شود. سپس با استفاده از تبدیل احتمال، برآمدها در فضای متغیرهای نرمال استاندارد یعنی فضای  $y$  به فضای متغیرهای اصلی یعنی فضای  $x$  منتقل می‌شوند. تبدیل نتف<sup>۱</sup> در این مطالعه به کار گرفته شده است چون این تبدیل برای محدوده گسترده از همبستگی‌ها کاربرد داشته و انتقال برآمد به فضای نرمال استاندارد مستقیم بوده و مستقل از ترتیب متغیرهای تصادفی است [۲۴].

در تحلیل حساسیت بر پایه قابلیت اعتماد، اگر  $\theta$  پارامتر توزیع حاشیه‌ای  $x_i$  باشد، هدف محاسبه حساسیت احتمال فراگذشت  $G$  نسبت  $\theta$  یعنی  $\partial G / \partial \theta$  خواهد بود. می‌توان نشان داد که این مقدار از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۴]:

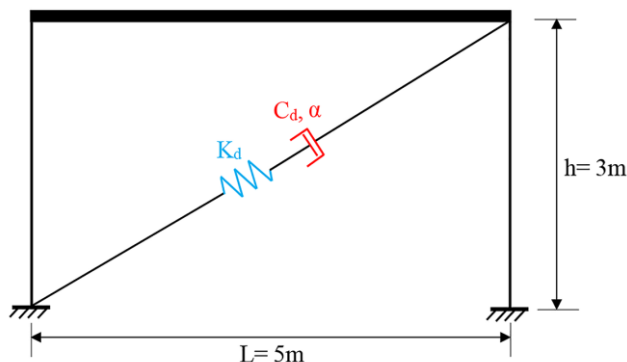
$$\frac{\partial G}{\partial \theta} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left( I(\mathbf{x}^k) \cdot \frac{\partial f_i(x_i^k)}{\partial \theta} \cdot \frac{1}{f_i(x_i^k)} \right) \quad (7)$$

که بالانویس  $k$  نشان دهنده برآمد نمونه  $k$ -ام است. بر اساس رابطه (۶)، برای محاسبه حساسیت نسبت به پارامترهای توزیع متغیر ناهمبسته  $x_i$ ، تابع چگالی احتمال (PDF) حاشیه‌ای و مشتق آن کافی خواهد بود. در تحلیل قابلیت اعتماد به روش نمونه‌گیری، ضریب تغییرات (CoV) (مقادیر EP به دست آمده معیار دقت احتمال محاسبه شده خواهد بود که بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$\text{CoV} \left[ \frac{\partial G}{\partial \theta} \right] = \sqrt{\frac{1}{K-1} \left( \frac{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left( I(\mathbf{x}^k) \cdot \frac{\partial f_i(x_i^k)}{\partial \theta} \cdot \frac{1}{f_i(x_i^k)} \right)^2}{\left( \frac{\partial G}{\partial \theta} \right)^2} - 1 \right)} \quad (8)$$

رویکرد تحلیل حساسیت توضیح داده شده برای تشخیص مؤثرترین پارامترها بر روی قابلیت اعتماد لرزه‌ای سازه به کار گرفته می‌شود. برای این منظور حساسیت شاخص قابلیت اعتماد نسبت به میانگین ( $\mu_i$ ) و انحراف معیار ( $\sigma_i$ ) هر متغیر تصادفی  $x_i$  یعنی به ترتیب  $\partial \beta / \partial \mu_i$  و  $\partial \beta / \partial \sigma_i$  محاسبه می‌شوند. این مقادیر برای محاسبه بردارهای اهمیت بدون بعد زیر در قابلیت اعتماد سازه‌ای به کار گرفته می‌شوند [۲۴]:

$$\delta = \left[ \frac{\partial \beta}{\partial \mu_i} \sigma_i \right] \quad (9)$$



شکل ۲. قاب برشی مورد مطالعه

Fig. 2. Studied shear frame

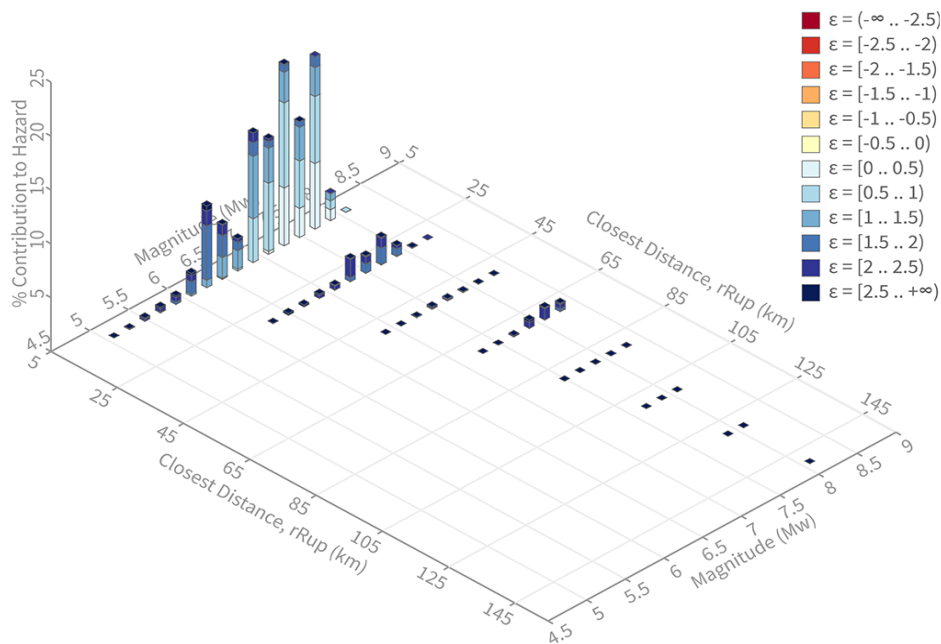
زمانی سازه‌ها، از طیف خطر یکنواخت ( $UHS^1$ ) به عنوان طیف هدف استفاده می‌شود در حالی که با این انتخاب به صورت محافظه‌کارانه مقادیر طیفی با دامنه بزرگ در تمامی پریودها به ازای یک رکورد زلزله رخ خواهند داد. به این دلیل طیف میانگین شرطی ( $CMS^2$ ) برای رفع این مشکل و کاهش عدم قطعیت در رکوردهای انتخابی به عنوان طیف هدف استفاده می‌شود [۲۶]. مقادیر پاسخ سازه‌ای به دست آمده بر اساس رکوردهای زلزله انتخاب شده بر اساس طیف میانگین شرطی سازگاری بیشتری با واقعیت دارند [۲۶]. طیف میانگین شرطی، طیف پاسخ میانگین مشروط به رخداد مقدار شتاب طیفی هدف در پریود مورد نظر (یعنی پریود مود اساسی سازه  $T_1$ ) را مهیا می‌نماید. در این مطالعه فرض شده است که قاب برشی معرفی شده در بخش ۴-۱ در ساختمان شهرداری لس‌آنجلس آمریکا (عرض و طول جغرافیایی به ترتیب  $33/943$  و  $-118/231$ ) با نوع خاک با سرعت موج برشی  $360$  m/s واقع شده است. بر اساس طیف پاسخ خطر یکنواخت به دست آمده از ابزار نگاشت و تحلیل سایت USGS (<http://earthquake.usgs.gov/research/hazmaps/interactive>) مقدار شتاب طیفی در پریود مود اول سازه ( $S_a(T_1)$ ) برابر با  $1/42$  g به دست می‌آید. لازم به ذکر است که پریود سازه حدود  $0.7$  s است. نتایج مربوط به تحلیل تفکیک<sup>۳</sup> خطر لرزه‌ای برای  $S_a(T_1) > 1.42g$  و به ازای احتمال فراگذشت  $2\%$  در  $50$  سال، در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج این تحلیل میانگین سناریوی زلزله حاکم در این منطقه  $\epsilon = 1.2$ ,  $R = 12.31$  km,  $M = 7.19$  است که  $M$  بزرگا،  $R$  فاصله و  $\epsilon$  تعداد انحراف‌های معیار است که مقدار

هستند. برای صلب در نظر گرفتن تیر در این قاب برشی، ممان اینرسی و سطح مقطع آن عدد بزرگی به نسبت ستون‌ها در حدود  $10^{12}$  برابر آن‌ها در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی قاب مربوطه از نرم‌افزار OpenS-ees استفاده شده و کدهای مربوطه در دسترس است [۳۲]. پای ستون‌ها به صورت گیردار مدل شده و به منظور صرف نظر نمودن از درجه آزادی تغییر شکل محوری تیر درجات آزادی مربوطه در گره‌های ابتدایی و انتهایی تیر به همدیگر مقید شده‌اند. تیر و ستون‌ها به صورت المان الاستیک با المان elasticBeamColumn مدل شده‌اند. برای مدل‌سازی میراگر ویسکوز غیرخطی از مصالح ViscousDamper استفاده شده و المان مربوط به این میراگر با المان twoNodeLink مدل‌سازی شده است. مشخصات میراگر ویسکوز غیرخطی در تعریف مصالح ViscousDamper، شامل سختی محوری  $K_d$ ، ضریب میرایی  $C_d$  و توان سرعت  $\alpha$  می‌شود. این سه پارامتر به منظور ملاحظه اثر زوال در طول زمان بهره‌برداری از میراگر به صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته شده‌اند؛ بنابراین بردار متغیرهای تصادفی  $\mathbf{x}$  معرفی شده در بخش ۳ شامل این سه پارامتر خواهد بود. فرض بر آن است که تمامی این متغیرهای تصادفی توزیع نرمال با ضریب تغییرات (CoV)  $10\%$  داشته باشند که برای بیشتر پارامترهای سیستم‌های مهندسی یک فرض متداول است [۳۳]. مقادیر میانگین  $K_d$ ،  $C_d$  و  $\alpha$  به ترتیب  $25$  kN/mm،  $0.35$  و  $20/7452$  kN.(s/mm)<sup>0.35</sup> هستند.

#### ۴-۲- انتخاب رکوردهای زلزله برای تحلیل تاریخچه زمانی

در اکثر مطالعات به منظور انتخاب رکوردهای زلزله برای تحلیل تاریخچه

- 1 Uniform Hazard Spectrum
- 2 Conditional Mean Spectrum
- 3 Deaggregation



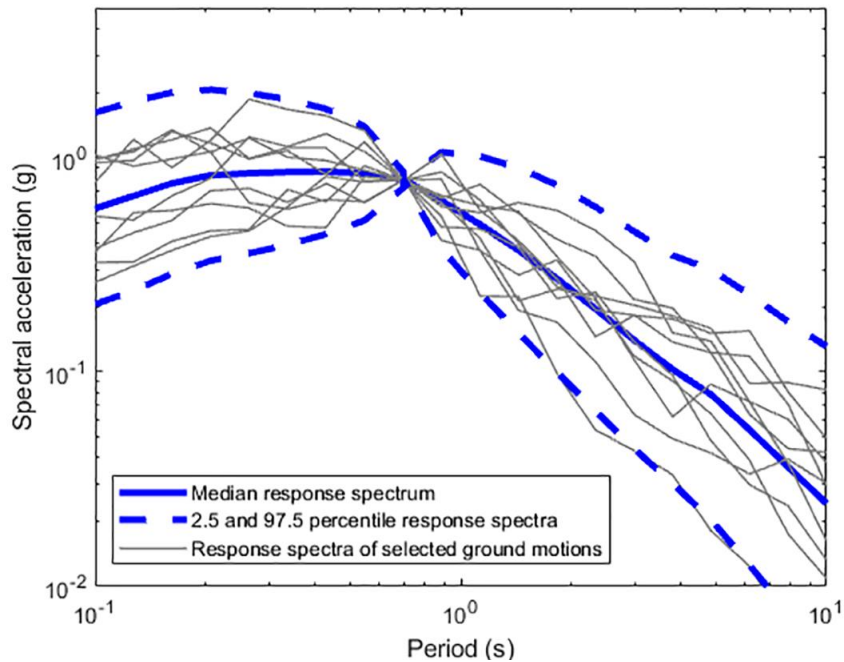
شکل ۳. تفکیک خطر لرزه‌ای برای ساختگاه مورد مطالعه (برگرفته از ابزار نگاشت و تحلیل USGS, <http://earthquake.usgs.gov/research/hazmaps/interactive>, 2021)

Fig. 3. Deaggregation of seismic hazard for the studied site (Adapted from mapping and analysis tool USGS, <http://earthquake.usgs.gov/research/hazmaps/interactive>, 2021)

#### ۳-۴- روند تحلیل

در این مطالعه ابتدا تحلیل قابلیت اعتماد قاب برشی مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی معرفی شده در بخش ۴-۱ به روش نمونه‌گیری مونت کارلو [۲۷] انجام می‌شود. بر اساس توضیحات داده شده در بخش ۴-۱، مدل غیرخطی قاب در نرم‌افزار OpenSees [۲۵] توسعه داده شده است. در این مدل سختی محوری  $K_d$ ، ضریب میرایی  $C_d$  و توان سرعت  $\alpha$  میراگر ویسکوز غیرخطی به صورت متغیر در نظر گرفته می‌شوند. برای تحلیل قابلیت اعتماد سازه از نرم‌افزار Rt [۲۸] استفاده خواهد شد. در این نرم‌افزار بردار متغیرهای تصادفی  $\mathbf{x} = \{K_d, C_d, \alpha\}$  با توجه به مشخصات آماری اشاره شده در بخش ۴-۱ تعریف می‌شوند. نرم‌افزار Rt قابلیت برقراری ارتباط با نرم‌افزار OpenSees را دارد. تحلیل قابلیت اعتماد به روش نمونه‌گیری به صورت کامل در بخش ۳ توضیح داده شده است. توابع ظرفیت  $R(\mathbf{x})$  و تقاضای  $S(\mathbf{x})$  معرفی شده در تابع حالت حدی رابطه (۲)، در این مطالعه بر حسب دریافت قاب تعریف می‌شوند. بنابراین تابع حالت حدی در این مطالعه به صورت رابطه زیر خواهد بود:

لگاریتم طبیعی یک شتاب طیفی مشخص از میانگین مقدار لگاریتم طبیعی شتاب طیفی پیش‌بینی شده به ازای بزرگا و فاصله مشخص (بر حسب رابطه کاهندگی) تفاوت دارد. بر حسب سناریوی لرزه‌ای حاکم به دست آمده طیف میانگین شرطی ساخته شده و پس از آن هر یک از رکوردهای موجود در پایگاه داده به منظور تطبیق با شتاب طیفی در زمان تناوب مود اول سازه مقیاس می‌شوند. رکوردیایی که منطبق بر طیف میانگین شرطی باشند، انتخاب خواهند شد که معیار این انطباق بر حسب درصد خطای محاسبه شده بین طیف هر رکورد و طیف میانگین شرطی ساخته شده است. در این تحقیق بر اساس پیشنهاد بیکر [۲۶] محدوده پریود  $0.2T_1$  تا  $2T_1$  یعنی در این مطالعه  $0.14$  تا  $1/4$  ثانیه برای انتخاب رکوردها و بررسی انطباق استفاده شده است. طیف پاسخ میانه و صدک  $2/5$  و  $97/5$  درصد به همراه طیف هر یک از رکوردهای زلزله انتخاب شده در شکل ۴ نشان داده شده و فهرست رکوردهای زلزله انتخاب شده به همراه ضریب مقیاس آن‌ها در جدول ۱ گزارش شده است.



شکل ۴. میانانه و صدک ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد طیف پاسخ به همراه طیف پاسخ هر یک از رکوردهای انتخاب شده

Fig. 4. Median, 2.5 and 97.5 percentiles of response spectrum with individual response spectra of selected ground motions

جدول ۱. مشخصات رکوردهای مورد استفاده در تحلیل تاریخیچه زمانی

Table 1. Characteristics of utilized records in the time history analysis

شماره	رکورد	ایستگاه	سال	بزرگا	فاصله (کیلومتر)	ضریب مقیاس
۱	Loma Prieta	Corralitos	۱۹۸۹	۶/۹۳	۳/۸۵	۰/۵۹
۲	Chi-Chi, Taiwan	ILA012	۱۹۹۹	۷/۶۲	۸۸/۱۸	۳/۸۳
۳	Chi-Chi, Taiwan	TCU050	۱۹۹۹	۷/۶۲	۹/۴۹	۱/۸۵
۴	Irpinia, Italy-01	Bagnoli Irpinio	۱۹۸۰	۶/۹	۸/۱۸	۲/۶۸
۵	Kocaeli, Turkey	Ambarli	۱۹۹۹	۷/۵۱	۶۹/۶۲	۱/۸۳
۶	Imperial Valley-06	El Centro Array #12	۱۹۷۹	۶/۵۳	۱۷/۹۴	۳/۴۶
۷	Chi-Chi, Taiwan	ILA051	۱۹۹۹	۷/۶۲	۷۹/۰۳	۳/۴۸
۸	Chi-Chi, Taiwan	TCU047	۱۹۹۹	۷/۶۲	۳۵/۰۰	۱/۱۶
۹	Chi-Chi, Taiwan	CHY010	۱۹۹۹	۷/۶۲	۱۹/۹۶	۲/۵۷
۱۰	Loma Prieta	Coyote Lake Dam-Southwest Abutment	۱۹۸۹	۶/۹۳	۲۰/۳۴	۲/۹۰



تعیین نمود. در حقیقت این روش یک رویه جامع بوده و نیازی به تکرار تحلیل نمونه‌گیری به ازای هر مقدار مشخص از  $Drift_{max}$  نخواهد بود. در نهایت بر حسب نتایج به دست آمده، تحلیل حساسیت قابلیت اعتماد قاب برشی نسبت به متغیرهای تصادفی بر حسب روابط (۶) تا (۱۰) ارائه شده در بخش ۳ انجام خواهد شد تا مؤثرترین متغیر تصادفی در قابلیت اعتماد قاب برشی معرفی شود.

## ۵- نتایج

تحلیل قابلیت اعتماد قاب برشی مورد مطالعه با استفاده از روش نمونه‌گیری مونت کارلو پیشینه‌نما انجام شده است. تعداد کل نمونه‌ها در این تحلیل ۱۳۲۷۱ بوده و مدت زمان این تحلیل تقریباً ۱۳ ساعت است. میانگین و انحراف معیار دررفت قاب به دست آمده از این تحلیل به ترتیب  $0/01562$  و  $0/0038$  هستند. نمودارهای تابع توزیع تجمعی ( $CDF^3$ )، ضریب تغییرات ( $CoV^4$ ) و همچنین احتمال فراگذشت یا انهدام ( $EP^5$ ) دررفت قاب بر اساس تحلیل نمونه‌گیری انجام شده در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

تحلیل نمونه‌گیری پیشینه‌نما به منظور داشتن تخمین اولیه از احتمال انهدام به ازای مقادیر مختلف از دررفت پیشینه‌نما انجام شده است. در نمودار  $CDF$  مطابق شکل ۵-الف واضح است که مقادیر کمتر از دررفت احتمال تجمعی کمتری خواهند داشت. در شکل ۵-ب نمودار ضریب تغییرات  $CoV$  شکل U پیدا کرده است، دلیل آن است که تعداد نمونه‌ها حول میانگین در حین تحلیل نمونه‌گیری بیشتر بوده و احتمال در نقاط دورتر از میانگین بر اساس تعداد نمونه‌های کمتری محاسبه شده است و مشخص است که هر چقدر تعداد نمونه‌ها کمتر باشد ضریب تغییرات بیشتر خواهد بود. البته لازم به ذکر است که در این روش نمونه‌گیری حول مبدأ انجام می‌گیرد و به این علت تعداد نمونه‌ها حول میانگین زیاد خواهد بود. بر اساس آیین‌نامه ASCE [۳۵] مقدار دررفت مجاز برای گروه ریسک I و II برابر  $0/025$ ، برای گروه خطر III برابر  $0/02$  و برای گروه خطر IV برابر  $0/015$  است. در شکل شماره ۵-پ احتمال فراگذشت به ازای سه مقدار دررفت  $0/015$ ،  $0/02$  و  $0/025$  مشخص شده است که به ترتیب برابر  $0/5783$ ،  $0/1525$  و  $0/0006$  هستند. از روند نمودار شکل ۵-پ کاملاً مشخص است که به ازای دررفت‌های بیشتر احتمال فراگذشت کمتری به دست خواهد آمد.

حال تحلیل نمونه‌گیری قاب برشی به ازای توابع حالت حدی تعریف

$$g(\mathbf{x}) = Drift_{max} - Drift(\mathbf{x}) \quad (12)$$

که در آن  $Drift_{max}$  دررفت پیشینه‌نما تعریف شده توسط آیین‌نامه بر اساس سطح عملکرد مورد نظر و  $Drift(\mathbf{x})$  مقدار دررفت قاب بر حسب مقدار متغیرهای تصادفی در تحلیل قابلیت اعتماد است. نحوه ارتباط بین دو نرم‌افزار OpenSees و Rt به گونه‌ای است که در هر مرحله بر حسب مقدار برآمد متغیرهای تصادفی ارسال شده از نرم‌افزار Rt، تحلیل قاب در نرم‌افزار OpenSees انجام شده و خروجی دررفت قاب برای ارزیابی تابع حالت حدی و در نهایت احتمال فراگذشت  $G$  (رابطه ۶) به نرم‌افزار Rt برگردانده می‌شود. لازم به ذکر است که در تعیین  $Drift(\mathbf{x})$  در نرم‌افزار OpenSees، تحلیل تاریخچه زمانی قاب با استفاده از رکوردهای زلزله جدول ۱ انجام می‌شود.

مراحل شبیه‌سازی مونت کارلو در نرم‌افزار Rt به شرح زیر است:

گام ۱- تولید برآمد تصادفی متغیرهای نرمال استاندارد؛ این مرحله با استفاده از توزیع نرمال استاندارد توأم<sup>۱</sup> انجام می‌شود. البته در مطالعه حاضر متغیرهای تصادفی به صورت مستقل در نظر گرفته شده‌اند.

گام ۲- تبدیل این برآمدها به بردار متغیرها در فضای اصلی  $\mathbf{x}$ ،

گام ۳- محاسبه تابع حالت حدی  $g(\mathbf{x})$  و تابع شاخص  $I$ ؛ لازم به ذکر است توضیحات لازم در مورد این تابع در بخش ۳ داده شده است،

گام ۴- بروز کردن احتمال فراگذشت (انهدام) که برابر با میانگین  $I$  محاسبه شده در گام قبلی است (رابطه ۶). با کاهش ضریب تغییرات تابع شاخص  $I$  دقت احتمال انهدام به دست آمده از نمونه‌گیری مونت کارلو بیشتر خواهد بود،

گام ۵- تکرار مراحل فوق تا زمانی که تعداد گام‌های لازم به دست آید. در این مطالعه در ابتدا از روش نمونه‌گیری مونت کارلو پیشینه‌نما<sup>۲</sup> [۳۴] به منظور تحلیل قابلیت اعتماد قاب برشی مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی استفاده شده است. تحلیل نمونه‌گیری توضیح داده شده در بالا بر اساس تابع حالت حدی معرفی شده در رابطه (۱۱) و به ازای یک  $Drift_{max}$  مشخص، یک احتمال فراگذشت (انهدام) خواهد داد. در حالی که در روش نمونه‌گیری پیشینه‌نما تحلیل بر روی  $Drift(\mathbf{x})$  بدون توجه به مقادیر معین از  $Drift_{max}$  انجام شده و در واقع توزیع احتمال تجمعی  $Drift(\mathbf{x})$  به دست خواهد آمد. بر اساس این توزیع احتمال تجمعی می‌توان در هر مقدار مشخص از  $Drift_{max}$  مقدار احتمال فراگذشت را

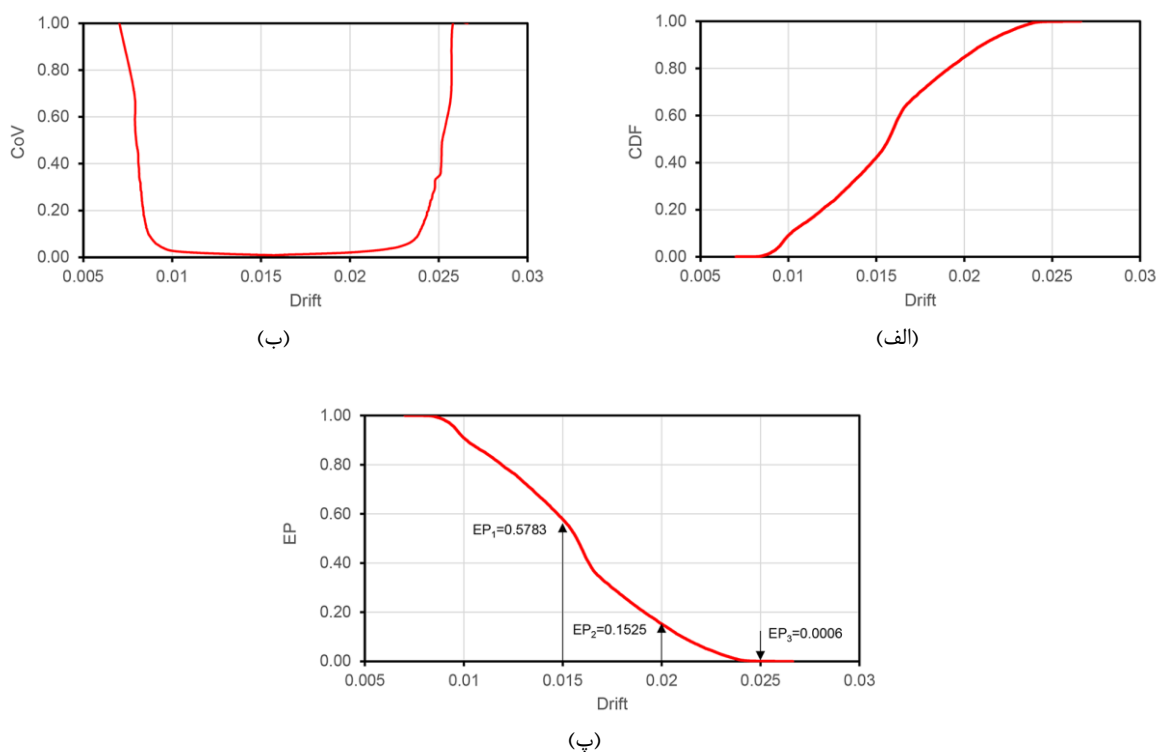
3 Cumulative Distribution Function

4 Coefficient of Variation

5 Exceedance Probability

1 Joint

2 Histogram



شکل ۵. نمودار تابع توزیع تجمعی (الف)، ضریب تغییرات (ب) و احتمال فراگذشت (انهدام) (پ) بر حسب دریفت قاب

Fig. 5. a) Cumulative distribution function, (b) coefficient of variation, and (c) exceedance probability with respect to frame drift

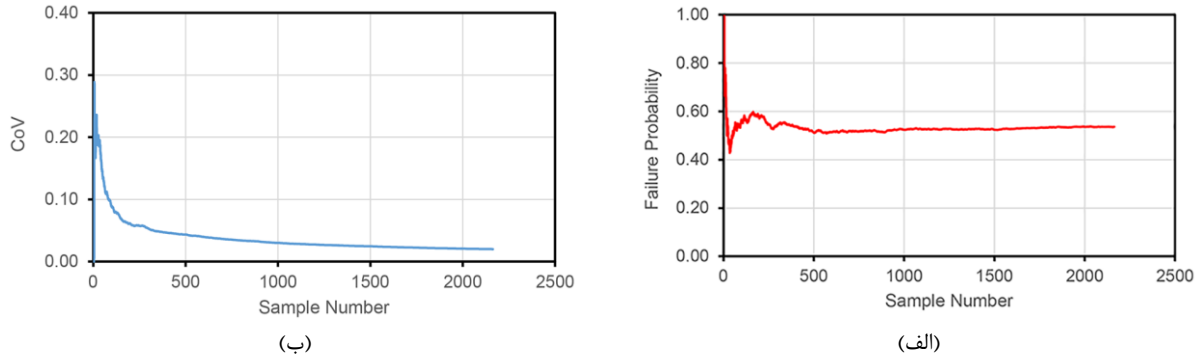
لازم به ذکر است در تحلیل نمونه‌گیری، تعداد نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شود که ضریب تغییرات یا پراکندگی احتمال خرابی به دست آمده عدد کوچکی باشد که معمولاً در تحلیل‌های مهندسی اعداد کمتر از ۰/۰۵ قابل قبول می‌باشد [۳۴]. واضح است که هر چقدر مقدار دریفت بیشینه عدد بزرگ‌تری انتخاب شود، با توجه به آن که احتمال خرابی عدد کوچک‌تری خواهد بود، نیاز به تعداد نمونه‌گیری بیشتری در راستای رسیدن به ضریب تغییرات مناسب خواهد بود که اشکال ۶ تا ۸ مؤید این مطلب هستند.

در تحلیل حساسیت مطابق بخش ۳، رابطه محاسبه مشتق احتمال فراگذشت یا انهدام نسبت به پارامترهای توزیع احتمال هر یک از متغیرهای تصادفی دخیل در مسئله یعنی  $\partial G / \partial \theta$  (رابطه ۶) و همچنین ضریب تغییرات آن (رابطه ۷) توضیح داده شد. بر اساس تحلیل نمونه‌گیری انجام شده به ازای هر یک از توابع حالت حدی، مشتق احتمال فراگذشت نسبت به میانگین ( $\partial G / \partial \mu$ ) و نسبت به انحراف معیار ( $\partial G / \partial \sigma$ ) به همراه ضریب تغییرات آن‌ها برای هر کدام از متغیرهای تصادفی سختی محوری  $K_d$ ، ضریب میرایی  $C_d$  و توان سرعت  $\alpha$  میراگر ویسکوز غیرخطی در

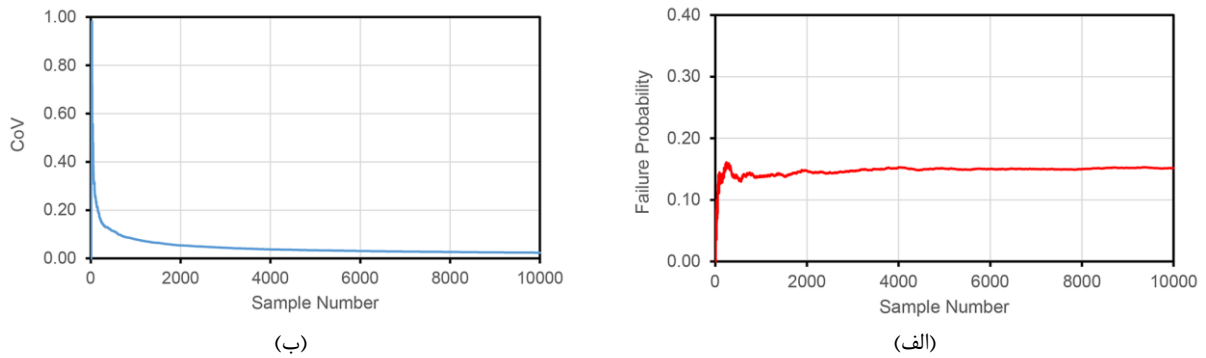
شده بر اساس سه سطح دریفت بیشینه (۰/۰۱۵، ۰/۰۲ و ۰/۰۲۵) انجام می‌شود تا بر اساس نتایج هر کدام از آن‌ها، تحلیل‌های حساسیت و اهمیت بر اساس رویه ارائه شده در بخش ۳ انجام گیرد. تاریخچه احتمال انهدام و ضریب تغییرات آن به ازای هر یک از توابع حالات حدی در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. در این روش تعداد نمونه‌ها ( $K$ ) با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$N = \frac{1}{\text{CoV}_G^2} \left( \frac{1-G}{G} \right) \quad (13)$$

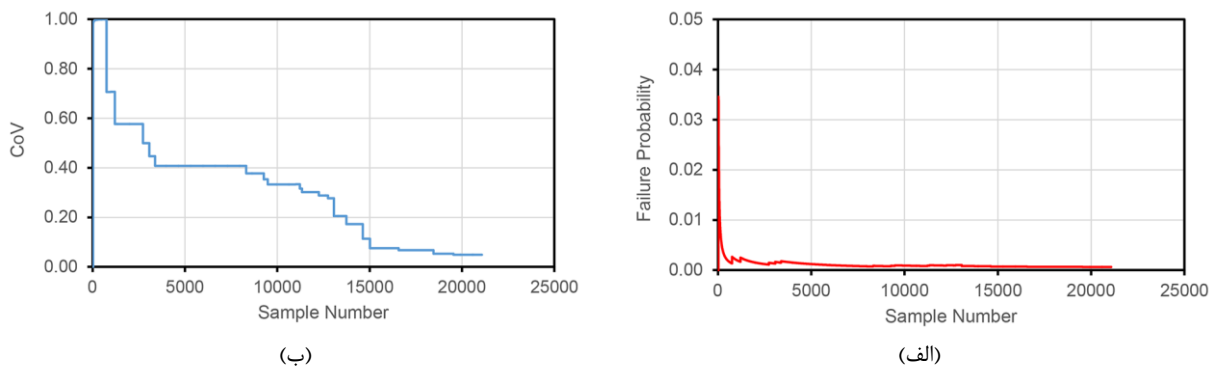
که در آن  $\text{CoV}_G$  ضریب تغییرات هدف و  $G$  احتمال انهدام است. مقدار ضریب تغییرات هدف توسط کاربر در نرم‌افزار Rt تعریف می‌شود. بر اساس شکل‌های ۶ تا ۸، احتمال خرابی به دست آمده و ضریب تغییرات آن به ازای هر سه تابع حالت حدی تعریف شده در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داده شده در جدول ۲ نشان دهنده تطابق مناسب بین این نتایج با نتایج تحلیل نمونه‌گیری به روش پیشینه‌نما (شکل ۵) می‌باشد.



شکل ۶. تاریخچه (الف) احتمال انهدام و (ب) ضریب تغییرات آن به ازای تابع حالت حدی  $g_1(x) = 0.015 - \text{Drift}(x)$   
**Fig. 6. (a) Exceedance probability and (b) coefficient of variation histories with respect to limit state function  $g_1(x) = 0.015 - \text{Drift}(x)$**



شکل ۷. تاریخچه (الف) احتمال انهدام و (ب) ضریب تغییرات آن به ازای تابع حالت حدی  $g_2(x) = 0.02 - \text{Drift}(x)$   
**Fig. 7. (a) Exceedance probability and (b) coefficient of variation histories with respect to limit state function  $g_2(x) = 0.02 - \text{Drift}(x)$**



شکل ۸. تاریخچه (الف) احتمال انهدام و (ب) ضریب تغییرات آن به ازای تابع حالت حدی  $g_3(x) = 0.025 - \text{Drift}(x)$   
**Fig. 8. (a) Exceedance probability and (b) coefficient of variation histories with respect to limit state function  $g_3(x) = 0.025 - \text{Drift}(x)$**

جدول ۲. نتایج تحلیل نمونه‌گیری به ازای توابع حالت حدی مختلف

Table 2. Results of sampling analysis with respect to different limit state functions

ضریب تغییرات	احتمال انهدام	تابع حالت حدی
۰/۰۱۹۹	۰/۵۳۶۳	$g_1(\mathbf{x}) = 0.015 - \text{Drift}(\mathbf{x})$
۰/۰۲۳۶	۰/۱۵۱۷	$g_2(\mathbf{x}) = 0.02 - \text{Drift}(\mathbf{x})$
۰/۰۴۸۶	۰/۰۰۰۶۲۲	$g_3(\mathbf{x}) = 0.025 - \text{Drift}(\mathbf{x})$

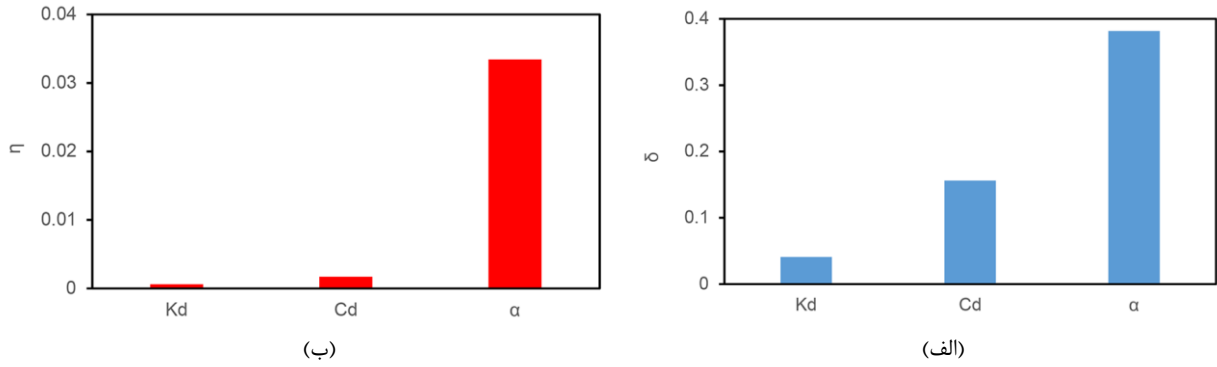
جدول ۳. نتایج تحلیل حساسیت‌سنجی به ازای توابع حالت حدی مختلف

Table 3. Results of sensitivity analysis with respect to different limit state functions

CoV( $\partial G / \partial \sigma$ )	$\partial G / \partial \sigma$	CoV( $\partial G / \partial \mu$ )	$\partial G / \partial \mu$	متغیر تصادفی	تابع حالت حدی
۰/۳۲۱۹	-۰/۰۰۰۳	۰/۲۴۸۲	-۰/۰۰۶۴	$K_d$	$g_1(\mathbf{x}) = 0.015 - \text{Drift}(\mathbf{x})$
۰/۹۴۰۳	-۰/۰۰۰۱	۰/۹۷۷۳	-۰/۰۳۰۴	$C_d$	
۰/۱۷۱۹	-۰/۳۷۹۴	۰/۱۰۰۲	-۴/۳۳۰۴	$\alpha$	
۰/۷۷۴۳	-۰/۰۰۲۶	۰/۰۶۷	۰/۰۰۰۳	$K_d$	$g_2(\mathbf{x}) = 0.02 - \text{Drift}(\mathbf{x})$
۰/۶۰۱۸	۰/۰۰۹۸	۰/۴۵۱۹	-۰/۰۲۸۶	$C_d$	
۰/۲۴۷۷	۰/۷۹۴۲	۰/۰۳۹۸	-۲/۹۴۲۲	$\alpha$	
۰/۸۰۱۲	۰/۰۰۰۴	۰/۲۷۴۷	-۰/۰۰۰۱	$K_d$	$g_3(\mathbf{x}) = 0.025 - \text{Drift}(\mathbf{x})$
۰/۳۵۳۹	۰/۰۰۱۸	۰/۲۹۹۸	-۰/۰۰۱	$C_d$	
۰/۳۲۵۱	۰/۱۲۲۷	۰/۲۸۶۶	-۰/۰۶۲۹	$\alpha$	

جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج گزارش شده در جدول ۳ و روابط ۸ تا ۱۰ ارائه شده در بخش ۳، بردارهای اهمیت  $\delta$  و  $\eta$  به ازای هر یک از توابع حالت حدی محاسبه می‌شوند. بردارهای به دست آمده به ازای هر یک از توابع حالت حدی  $g_1(\mathbf{x})$ ،  $g_2(\mathbf{x})$  و  $g_3(\mathbf{x})$  به ترتیب در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند. نتایج دلالت بر آن دارند که به ازای هر سه تابع حالت حدی، توان سرعت  $\alpha$  میراگر ویسکوز غیرخطی بیشترین مقدار  $\delta$  و  $\eta$  را دارد. بیشترین مقدار  $\delta$  نشان دهنده آن است که متغیر تصادفی  $\alpha$  مؤثرترین پارامتر در قابلیت اعتماد قاب برشی بوده و بیشترین مقدار  $\eta$  نیز نشان دهنده آن است که عدم قطعیت متغیر تصادفی  $\alpha$  بیشترین تأثیر را در قابلیت اعتماد قاب برشی خواهد داشت. با افزایش مقدار دررفت بیشینه در تابع حالت حدی به خصوص در تابع  $g_3(\mathbf{x})$  و کاهش احتمال انهدام، اهمیت متغیر تصادفی ضریب میرایی  $C_d$  میراگر ویسکوز غیرخطی

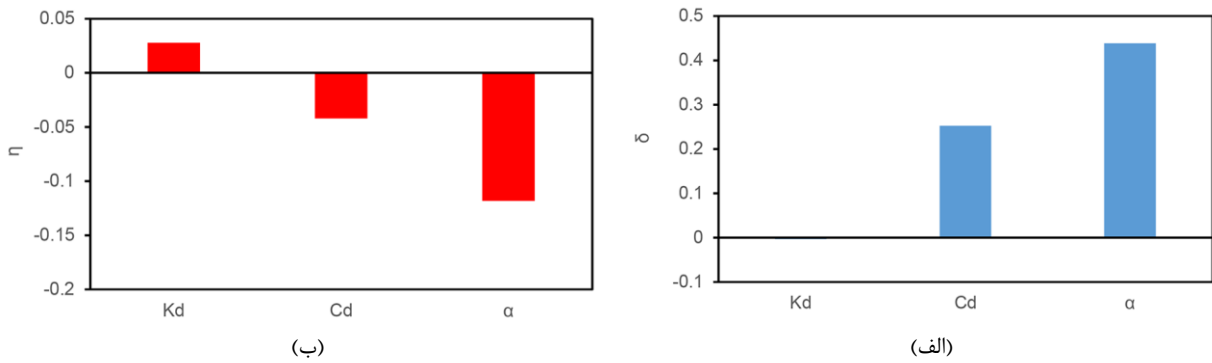
به صورت محسوسی افزایش یافته و تقریباً نزدیک به اهمیت متغیر تصادفی  $\alpha$  است. در تمامی توابع حالت حدی، تمامی مقادیر بردار  $\delta$  مثبت است که نشان دهنده آن است که تمامی متغیرهای تصادفی  $K_d$ ،  $C_d$  و  $\alpha$  متغیرهای از جنس مقاومت هستند یعنی با افزایش مقادیر آن‌ها قابلیت اعتماد قاب برشی افزایش یافته و بالعکس. البته در تابع حالت حدی  $g_2(\mathbf{x})$  مقدار  $\delta$  برای متغیر تصادفی  $K_d$  برابر  $-۰/۰۰۳۵۶$  به دست آمده که نزدیک به صفر بوده و اهمیت چندانی در قابلیت اعتماد قاب برشی ندارد. به ازای مقادیر پایین دررفت بیشینه به خصوص در تابع حالت حدی  $g_1(\mathbf{x})$  برای تمامی متغیرهای تصادفی و همچنین در تابع حالت حدی  $g_2(\mathbf{x})$  برای متغیر تصادفی  $K_d$  مقادیر بردار  $\eta$  مثبت به دست آمده است. یعنی در این حالات افزایش عدم قطعیت متغیرهای تصادفی منجر به افزایش قابلیت اعتماد قاب برشی می‌شود و بالعکس. از طرف دیگر در تابع حالت حدی  $g_2(\mathbf{x})$  برای متغیرهای تصادفی  $C_d$  و  $\alpha$  و همچنین در تابع حالت حدی  $g_3(\mathbf{x})$



شکل ۹. پارامتر اهمیت (الف)  $\delta$  و (ب)  $\eta$  برای متغیرهای تصادفی به ازای تابع حالت حدی  $g_1(x) = 0.015 - \text{Drift}(x)$

**Fig. 9.**  $\delta$  and (b)  $\eta$  importance parameters of random variables with respect to limit state function

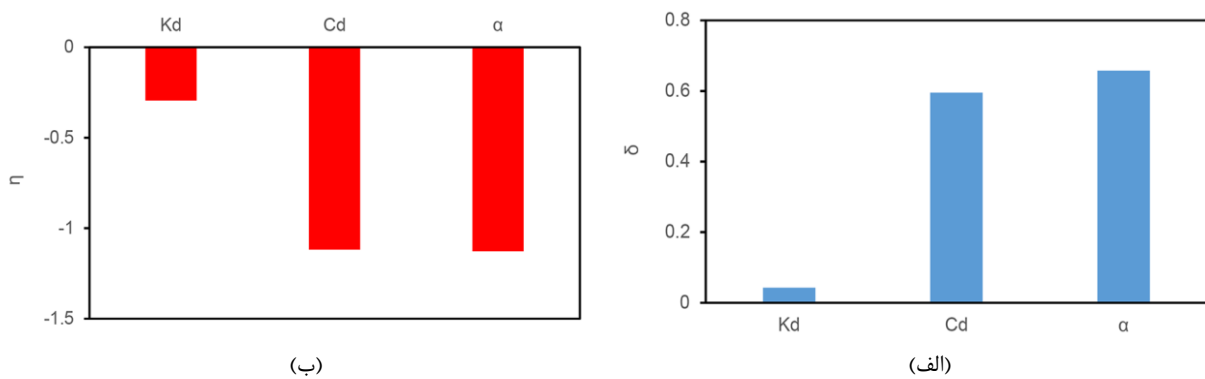
$$g_1(x) = 0.015 - \text{Drift}(x)$$



شکل ۱۰. پارامتر اهمیت (الف)  $\delta$  و (ب)  $\eta$  برای متغیرهای تصادفی به ازای تابع حالت حدی  $g_2(x) = 0.02 - \text{Drift}(x)$

**Fig. 10.**  $\delta$  and (b)  $\eta$  importance parameters of random variables with respect to limit state function

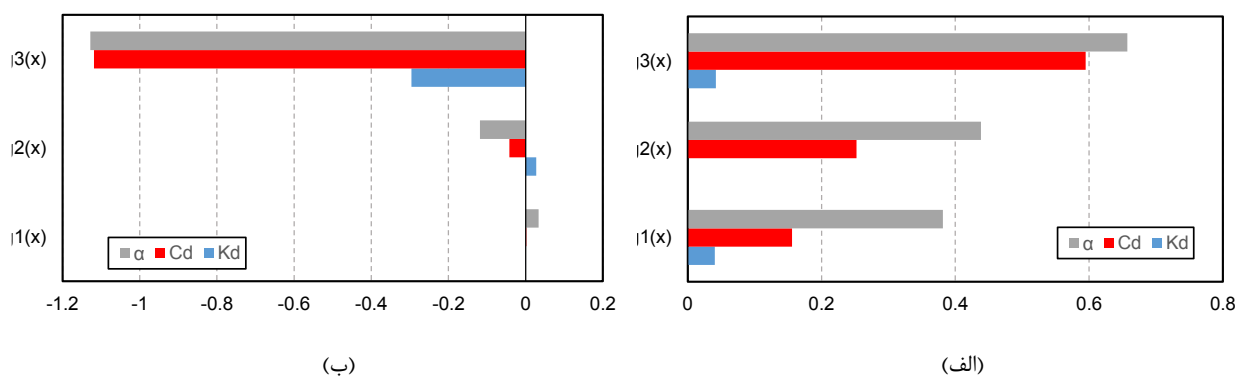
$$g_2(x) = 0.02 - \text{Drift}(x)$$



شکل ۱۱. پارامتر اهمیت (الف)  $\delta$  و (ب)  $\eta$  برای متغیرهای تصادفی به ازای تابع حالت حدی  $g_3(x) = 0.025 - \text{Drift}(x)$

**Fig. 11.**  $\delta$  and (b)  $\eta$  importance parameters of random variables with respect to limit state function

$$g_3(x) = 0.025 - \text{Drift}(x)$$



شکل ۱۲. پارامتر اهمیت (الف)  $\delta$  و (ب)  $\eta$  برای متغیرهای تصادفی به ازای توابع حالت حدی مختلف

Fig. 12. (a)  $\delta$  and (b)  $\eta$  importance parameters of random variables with respect to different limit state functions

شده است.

۲- به ازای تمامی توابع حالت حدی، متغیر تصادفی توان سرعت میراگر ویسکوز غیرخطی بیشترین تأثیر را بر روی قابلیت اعتماد قاب برشی دارد.

۳- به ازای تمامی توابع حالت حدی، عدم قطعیت متغیر تصادفی توان سرعت میراگر ویسکوز غیرخطی بیشترین تأثیر را بر روی قابلیت اعتماد قاب برشی دارد.

۴- در تابع حالت حدی تعریف شده بر اساس مقدار پایین دریافت بیشینه و احتمال انهدام بزرگتر، متغیر تصادفی توان سرعت با فاصله زیادی نسبت به سایر متغیرهای تصادفی با اهمیت‌ترین آن‌ها است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار اهمیت متغیر تصادفی ضریب میرایی به عنوان دومین متغیر تصادفی با اهمیت در قابلیت اعتماد قاب نسبت به توان سرعت به ازای دریافت بیشینه ۰/۰۱۵، ۵۹ درصد کمتر است.

۵- در تابع حالت حدی تعریف شده بر اساس مقدار بالای دریافت بیشینه و احتمال انهدام کوچکتر، اهمیت متغیر تصادفی ضریب میرایی بسیار نزدیک به متغیر تصادفی توان سرعت است. به این صورت که مقدار اهمیت متغیر تصادفی ضریب میرایی نسبت به توان سرعت به ازای دریافت بیشینه ۰/۰۲۵، ۹/۵ درصد کمتر است.

۶- در تمامی حالات سختی محوری کم اهمیت‌ترین متغیر تصادفی در قابلیت اعتماد قاب است.

۷- تمامی متغیرهای تصادفی توان سرعت، ضریب میرایی و سختی محوری از جنس مقاومت بوده و افزایش آن‌ها منجر به افزایش قابلیت

برای تمامی متغیرهای تصادفی مقادیر بردار  $\eta$  منفی به دست آمده که نشان دهنده آن است که افزایش انحراف معیار این متغیرهای تصادفی موجب کاهش قابلیت اعتماد قاب برشی می‌شود و بالعکس. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بردار اهمیت  $\eta$  به ازای تابع حالت حدی  $g_1(\mathbf{X})$  اعداد کوچکی هستند که نشان دهنده آن است که به ازای دریافت بیشینه پایین و احتمال خرابی بالا، عدم قطعیت متغیرهای تصادفی تأثیر چندانی بر روی قابلیت اعتماد قاب نداشته است. در شکل ۱۲ مقادیر بردارهای اهمیت در حالات حدی مختلف مقایسه شده است. این شکل دلالت بر ناچیز بودن مقادیر  $\eta$  در تابع حالت حدی  $g_1(\mathbf{X})$  دارد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تحلیل قابلیت اعتماد لرزه‌ای و همچنین تحلیل حساسیت و اهمیت بر پایه قابلیت اعتماد قاب برشی مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی انجام شده است. مدل ماکسول برای مدل‌سازی میراگرهای ویسکوز غیرخطی استفاده شده و پارامترهای درگیر در آن یعنی توان سرعت، ضریب میرایی و سختی محوری به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شدند. نتایج زیر در این مطالعه حاصل شده است:

۱- تحلیل قابلیت اعتماد قاب برشی با استفاده از روش نمونه‌گیری پیشینه‌نما نشان می‌دهد که به ازای دریافت بیشینه بزرگتر احتمال خرابی کمتری برای قاب به دست خواهد آمد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دریافت بیشینه از ۰/۰۱۵ به ۰/۰۲ منجر به کاهش ۷۲ درصدی احتمال انهدام

شاخص قابلیت اعتماد	$\beta$	اعتماد قاب می‌شود.
بردار اهمیت	$\delta$	۸-در تابع حالت حدی تعریف شده بر اساس مقدار پایین دررفت بیشینه و احتمال انهدام بزرگ‌تر، افزایش یا کاهش عدم قطعیت متغیرهای تصادفی تأثیر چندانی بر روی قابلیت اعتماد قاب ندارد.
معادل با تعداد انحراف معیاری است که مقدار لگاریتم طبیعی یک شتاب طیفی مشخص از میانگین مقدار لگاریتم طبیعی شتاب طیفی پیش‌بینی شده به ازای بزرگا و فاصله مشخص تفاوت دارد	$\varepsilon$	۹-در تابع حالت حدی تعریف شده بر اساس مقدار بالای دررفت بیشینه و احتمال انهدام کوچک‌تر، افزایش انحراف معیار متغیرهای تصادفی منجر به کاهش قابلیت اعتماد قاب می‌شود.
بردار اهمیت	$\eta$	لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر قاب‌های ساختمانی واقعی طراحی و تحلیل نشده‌اند، لذا در مطالعات آتی می‌توان تحلیل قابلیت اعتماد و حساسیت قاب‌های ساختمانی واقعی مجهز شده به میراگر ویسکوز غیرخطی را به منظور پایش میزان اهمیت متغیرهای تصادفی درگیر در قابلیت اعتماد آن‌ها انجام داد.
پارامتر توزیع حاشیه‌ای هر متغیر تصادفی	$\theta$	
میانگین	$\mu$	
انحراف معیار	$\sigma$	
تابع چگالی احتمال استاندارد نرمال	$\varphi$	
تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد	$\Phi$	

### منابع

### ۷- فهرست علائم

- [1] T. Soong, and G. Dargush, Passive energy dissipation systems in structural engineering, John Wiley & Sons: Chichester, United Kingdom (1997).
- [2] C. Christopoulos, A. Filiatrault, Principles of supplemental damping and seismic isolation, IUSS Press: Milan, Italy, (2006).
- [3] M. Symans, F. Charney, A. Whittaker, M. Constantinou, C. Kircher, M. Johnson, and R. McNamara, Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments, Journal of Structural Engineering, 134(1) (2008) 3-21.
- [4] I. Takewaki, Building control with passive dampers: optimal performance-based design for earthquakes, John Wiley & Sons: Asia, Singapore, (2011).
- [5] M.C. Constantinou, T.T. Soong, and G.F. Dargush, Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University of Buffalo, USA, (1998).
- [6] K. Kasai, A. Mita, H. Kitamura, K. Matsuda, T.A. Morgan, and A.W. Taylor, Performance of seismic protection technologies during the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. Earthquake Spectra, 29(S1) (2013) 265-293.
- [7] E. Miranda, G. Mosqueda, R. Retamales, and G. Pekcan, Performance of nonstructural components during the 27

ضریب میرایی	$C_d$
تابع توزیع تجمعی	CDF
ضریب تغییرات	CoV
دررفت بیشینه	Drift <sub>max</sub>
دررفت قاب به ازای برآمد متغیرهای تصادفی $\mathbf{x}$	Drift( $\mathbf{x}$ )
احتمال فراگذشت	EP
نیروی میراگر در زمان $t$	$F_d(t)$
تابع چگالی احتمال متغیرهای تصادفی $\mathbf{x}$	$f_x(\mathbf{x})$
تابع حالت حدی	$g$
احتمال فراگذشت یا انهدام	$G$
تابع شاخص	$I$
تعداد نمونه‌ها در تحلیل نمونه‌گیری	$K$
بزرگای زلزله	$M$
فاصله کنونی	$R$
ظرفیت سیستم به ازای برآمد متغیرهای تصادفی $\mathbf{x}$	$R(\mathbf{x})$
تقاضای سیستم به ازای برآمد متغیرهای تصادفی $\mathbf{x}$	$S(\mathbf{x})$
تابع علامت	sgn
پریود مود اساسی سازه	$T_1$
سرعت ضربه‌گیر در زمان $t$	$\dot{u}_d(t)$
بردار متغیرهای تصادفی	$\mathbf{x}$
بردار برآمدهای متغیرهای تصادفی در نمونه $k$ th	$\mathbf{x}^k$
فضای متغیرهای نرمال استاندارد	$\mathbf{y}$
توان سرعت	$\alpha$

- [17] J.C. Maxwell, On the dynamical theory of gases, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series, 157 (1867) 49-88.
- [18] N. Makris N, and M. Constantinou, Fractional-derivative maxwell model for viscous dampers, Journal of Structural Engineering, 117(9) (1991) 2708-2724.
- [19] M. Singh, N. Verma, and L. Moreschi, Seismic analysis and design with maxwell dampers, Journal of Engineering Mechanics, 129(3) (2003) 273-282.
- [20] H. Ataei, and K. Kalbasi Anaraki, A proposed structural design method considering fluid viscous damper degradations, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 27(15) (2018) e1512.
- [21] N. Pollini, O. Lavan, and O. Amir, Adjoint sensitivity analysis and optimization of hysteretic dynamic systems with nonlinear viscous dampers, Structural and Multidisciplinary Optimization, 57 (2018) 2273-2289.
- [22] N. Pollini, O. Lavan, and O. Amir, Minimum-cost optimization of nonlinear fluid viscous dampers and their supporting members for seismic retrofitting, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 46(12) (2017) 1941-1961.
- [23] P. Bjerager, and S. Krenk, Parametric sensitivity in first order reliability theory, Journal of Engineering Mechanics, 115(7) (1989) 1577-1582.
- [24] H. Talebiyan, and M. Mahsuli, Sampling-Based reliability sensitivity analysis using direct differentiation, ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 6(2) (2020) 04020015.
- [25] F. McKenna, OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation, Computing in Science and Engineering, 13(4) (2011) 58-66.
- [26] J.W. Baker, Conditional mean spectrum: Tool for ground-motion selection, Journal of Structural Engineering, 137(3) (2011) 322-331.
- [27] A. Shapiro, Monte Carlo sampling methods, Handbooks in Operations Research and Management Science, 10 (2003) 353-425.
- [28] M. Mahsuli, and T. Haukaas, Computer program for February 2010 Chile Earthquake, Earthquake Spectra, 28(S1) (2012) 453-471.
- [8] M.C. Constantinou, and M.D. Symans, Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2(2) (1993) 93-132.
- [9] M. Martinez-Rodrigo, and M.L. Romero, An optimum retrofit strategy for moment resisting frames with nonlinear viscous dampers for seismic applications, Engineering Structures, 25 (2003) 913-925.
- [10] M.D. Di Paola, L.L. Mendola, and G. Navarra, Stochastic seismic analysis of structures with nonlinear viscous dampers, Journal of Structural Engineering, 133 (2007) 1475-1478.
- [11] E.M. Guneyisi, and G. Altay, Seismic fragility assessment of effectiveness of viscous dampers in R/C buildings under scenario earthquakes, Structural Safety 30 (2008) 461-480.
- [12] O. Lavan, and M. Avishur, Seismic behavior of viscously damped yielding frames under structural and damping uncertainties, Bulletin of Earthquake Engineering, 11 (2013) 2309-2332.
- [13] J.I. Colombo, and J.L. Almazan, Seismic reliability of continuously supported steel wine storage tanks retrofitted with energy dissipation devices, Engineering Structures, 98 (2015) 201-211.
- [14] A. Dall'Asta, E. Tubaldi, and L. Rangi, Influence of the nonlinear behavior of viscous dampers on the seismic demand hazard of building frames, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 45 (2016) 149-169.
- [15] D. Altieri, E. Tubaldi, M. Broggi, and E. Patelli, Reliability-based methodology for the optimal design of viscous dampers, In 14th International Probabilistic Workshop, Springer, Cham, pp. 427-439, (2017).
- [16] S. Akcelyan, D.G. Lignos, and T. Hikino, Adaptive numerical method algorithms for nonlinear viscous and bilinear oil damper models subjected to dynamic loading, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 113 (2018) 488-502.



- OpenSeesWiki online manual, Available at: [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/ViscousDamper\\_Material](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/ViscousDamper_Material) (Aug. 03, 2021).
- [33] S. Öncü-Davas, and C. Alhan, Reliability of semi-active seismic isolation under near-fault earthquakes, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 114 (2019) 146-164.
- [34] M. Mahsuli, Probabilistic models, methods, and software for evaluating risk to civil infrastructure, Doctoral dissertation, University of British Columbia, (2012).
- [35] ASCE/SEI 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineering, Washington, D. C, USA, (2016).
- multimodel reliability and optimization analysis, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(1) (2013) 87-98.
- [29] D. Shen, and S. Kookalani, S. Effect of fluid viscous damper parameters on the seismic performance, *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 4(3) (2020) 141-153.
- [30] K. Kasai, and K. Matsuda, Full-scale dynamic testing of response-controlled buildings and their components: concepts, methods, and findings, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 13(1) (2014) 167-181.
- [31] B. Dong, R. Sause, and J.M. Ricles, Accurate real-time hybrid earthquake simulations on large-scale MDOF steel structure with nonlinear viscous dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44(12) (2015) 2035-2055.
- [32] ViscousDamper, ViscousDamper material,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. R. Seify Asghshahr, *Reliability-based Sensitivity Analysis of Shear Frame Equipped with Nonlinear Viscous Damper*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(10) (2023) 3801-3818.

DOI: 10.22060/ceej.2022.20419.7418



